

山岳地形上流れの LES (その2)

- 各種 SGS モデルの比較 -

飯塚 悟・近藤裕昭 (産業技術総合研究所)

1. 序

前報¹⁾に引き続き、山岳地形上流りを LES により解析する。前報では static な標準 Smagorinsky モデル (S モデル) を用いた LES 解析を行い、平均風速分布に関しては風洞実験結果²⁾と良い一致が得られるものの、乱流エネルギーの評価等において実験との差異がやや大きくなる結果を示した。本報ではこの改善等を目的として、dynamic Smagorinsky モデル (DS モデル)^{3), 4)}及びハイブリッド型 SGS モデル (ハイブリッドモデル) を導入した LES 解析を行い、実験結果²⁾及び標準 Smagorinsky モデルの結果と比較し、予測精度の検証を行う。

2. 計算概要

2.1 計算対象 孟らの風洞実験²⁾と同じ余弦の 2 乗の断面形状を持つ 2 次元山岳地形モデル上の中立大気乱流場。地表面全体が高さ 5m 程度の樹木に覆われている “rough” な地表面被覆状況を想定^{1), 2)}。風洞基準風速 $U_{ref} (=5.9\text{m/s})$ と山の高さ $H (=40\text{mm})$ に基づく Reynolds 数は 1.57×10^4 。

2.2 計算ケース 表 1 に示す。SGS モデルを変化させた計 3 ケース。ハイブリッドモデルについては 3.2 で後述。

2.3 計算条件 主な計算条件は前報¹⁾参照。但し、前報から計算領域を $60H(x_1) \times 4H(x_2) \times 22.5H(x_3)$ に、計算格子数を $143(x_1) \times 20(x_2) \times 32(x_3) = 91,520$ に変更している。

3. 計算結果

以下に示す LES の結果は全て、3 次元計算に基づく瞬時結果を無次元時間 180 (U_{ref} で主流 (x_1) 方向の計算領域 3 周分) で時間平均し、さらにスパン (x_2) 方向の平均を施したものである。尚、以下に示す諸量は U_{ref} 及び H で無次元化し、零面変位 (風洞実験粗度要素高さの 0.6 倍 ($=0.075H$) で変位²⁾) させた高さを用いて表記する。

3.1 S モデルと DS モデルの比較 (case 1, 2)

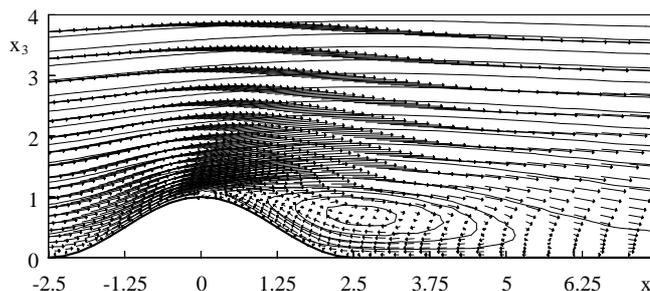
(1) 平均風速ベクトルと流線 図 1 に S モデルと DS モデルの平均風速ベクトルを流線と重ねて示す。両モデルの結果ともに山頂部 ($x_1 = 0, x_3 = 1$) 付近で流れが剥離し、山後方に循環流域を形成している。しかしその大きさは大きく異なり、S モデルに比べて DS モデルの循環流域は遥かに小さい。後述するように、この差異は主に流れが山に流入するまでの地表面ごく近傍の乱流性状の評価の違いに起因している。

(2) $\langle \bar{u}_1 \rangle$ の鉛直分布 図 2 は主流方向平均風速 $\langle \bar{u}_1 \rangle$ の鉛直分布について、実験²⁾、S モデル及び DS モデルの結果を比較したものである。S モデルの結果は実験と良く一致した結果となっている。一方、DS モデルの結果は前述したように山後方の循環流域を過小評価するため、速度回復が早くなり、山後方領域で実験との差異が大きくなる。

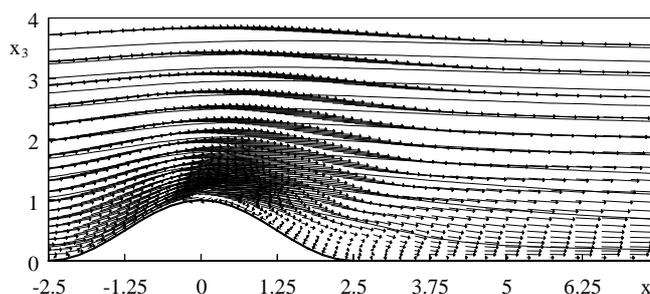
(3) 山に流入する流れの地表面近傍の性状 S モデルと DS モデルの予測精度の差異は流れが剥離する前、風上側山麓の地表面ごく近傍において既に生じており (図 2 の $x_1 = -1.25$ 及び $x_1 = -2.5$ のライン参照) これが生じた性状や後流の予測精度に大きな影響を及ぼしていると考えられる。そこで以下では、 $x_1 = -3.75$ における地表面近傍の流れ、即ち、流れが山

表 1 計算ケース

	使用した SGS モデル
case 1	標準 Smagorinsky モデル (S モデル)
case 2	dynamic Smagorinsky モデル (DS モデル)
case 3	ハイブリッド型 SGS モデル (ハイブリッドモデル)



(1) S モデル



(2) DS モデル

図 1 平均風速ベクトルと流線

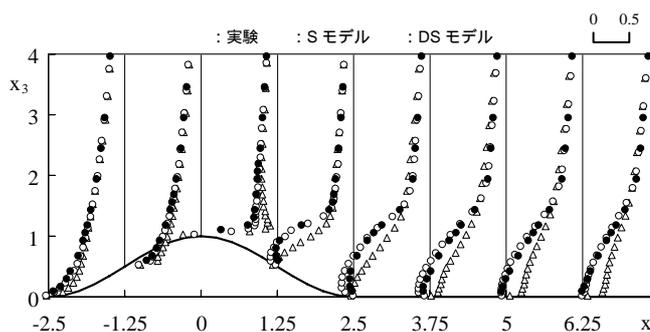


図 2 主流方向平均風速 $\langle \bar{u}_1 \rangle$ の鉛直分布

に流入する以前の地表面近傍の流れに着目し、S モデルと DS モデルの乱流性状の評価の違いを検討する。

地表面近傍の風速ベクトル 図 3 に $x_1 = -3.75$ における地表面近傍の平均風速ベクトルを示す。DS モデルの結果は S モデルの結果に比べて地表面ごく近傍まで風速が増加した分布となっている。このような地表面ごく近傍の風速分布の違いにより剥離性状が変化し、さらには山後方循環流域の性状が変化したものと考えられる。

地表面近傍の $\langle C \rangle^{1/2}$ と $\langle v_{SGS} \rangle$ の鉛直分布 図4、図5に図3と同じ位置 ($x_1 = -3.75$) におけるモデル係数 $\langle C \rangle^{1/2}$ (但し S モデルの結果は Smagorinsky 定数 (=0.1) に Van-Driest 型減衰関数を乗じたもの) と SGS 渦動粘性係数 $\langle v_{SGS} \rangle$ の鉛直分布を示す。図4に示すように、地表面ごく近傍において DS モデルは S モデルに比べて $\langle C \rangle^{1/2}$ の値が小さい。この差異は図5に示す $\langle v_{SGS} \rangle$ の分布性状に密接に関連する。つまり、地表面ごく近傍において DS モデルは S モデルに比べて $\langle v_{SGS} \rangle$ の値が小さくなり、その結果 total の乱流拡散が減少し (地表面ごく近傍を考えているので SGS 成分が支配的) 地表面ごく近傍まで平均風速が増加したものと考えられる。(この仕組みの詳細は紙面の都合上省略。講演時に説明する)

3.2 ハイブリッドモデルの適用 (case 3)

DS モデルの予測精度改善のための方策の1つとして、以下ではハイブリッドモデルの適用を考える。ここで導入するハイブリッドモデルは、DS モデルにおいてモデル係数 C を過小評価する地表面第1~第3セルまでの領域 (図4参照) に S モデル、その他の領域に DS モデルを適用するものである。

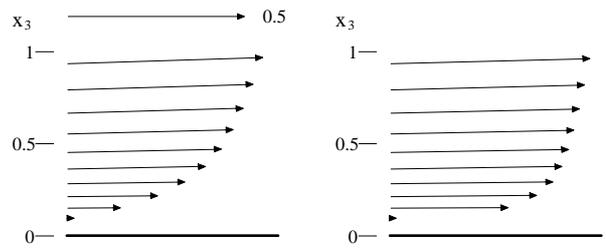
(1) $\langle \bar{u}_1 \rangle$ の鉛直分布 図6に主流方向平均風速 $\langle \bar{u}_1 \rangle$ の鉛直分布を示す。ハイブリッドモデルの結果は S モデルの結果と同様、実験²⁾と極めて良く一致した結果となっている。

(2) 乱流エネルギーの鉛直分布 図7は乱流エネルギー k の鉛直分布について、実験、S モデル及びハイブリッドモデルの結果を比較したものである。但し、S モデルとハイブリッドモデルの LES の結果は k の GS 成分のみを表示している。S モデルの結果は山後方の剥離されてきた流れと循環流域の間 (自由せん断層域) 付近をピークとして k を過大評価し、実験との差異が大きい。一方、ハイブリッドモデルは、剥離直後では依然として k の過大評価が見られるものの ($x_1 = 1.25$ のライン参照) $x_1 \geq 2.5$ の領域では S モデルに比べて k の過大評価が格段に抑えられ、実験との対応が大幅に改善されている。ハイブリッドモデルで自由せん断層域及びその付近に適用されている SGS モデルは DS モデルであり、DS モデルの効果により k の過大評価が改善されている。以上のように、ハイブリッドモデルでは地表面ごく近傍の領域に S モデルを適用することにより、山に流入する流れの地表面近傍の乱流性状が正しく評価され、剥離性状や山後方循環流を正しく予測する。さらに、山後方領域においては DS モデルの効果により、自由せん断層域を中心として乱流性状の予測精度が向上する。

4. まとめ

平均風速分布に関して、DS モデルの結果は実験や S モデルの結果に比べて山後方循環流域を大幅に過小評価する。この DS モデルの予測精度の悪化は流れが山に流入するまでの地表面ごく近傍の乱流性状の評価、特に地表面ごく近傍のモデル係数 C の過小評価に起因する。この改善のために、地表面ごく近傍を S モデル、その他の領域を DS モデルとするハイブリッドモデルを導入した。ハイブリッドモデルの結果は平均風速分布のみならず、乱流エネルギーに関して実験結果と良く一致する。

記号 x_i : 空間座標の3成分, u_i : 風速の3成分
($i=1$: 主流方向, $i=2$: スパン方向, $i=3$: 鉛直方向)
 \bar{f} : 変数 f に grid filter を施した値, $\langle f \rangle$: 変数 f の時間平均値,



(1) S モデル (2) DS モデル
図3 地表面近傍の平均風速ベクトル ($x_1 = -3.75$)

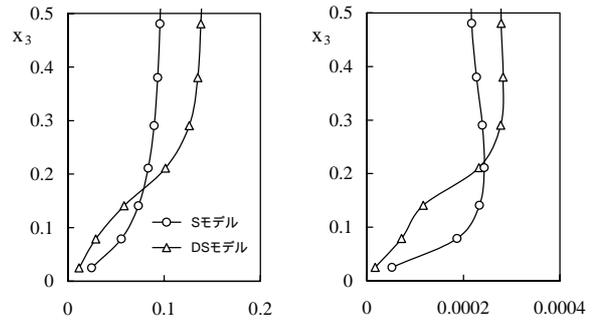


図4 $\langle C \rangle^{1/2}$ 図5 $\langle v_{SGS} \rangle$

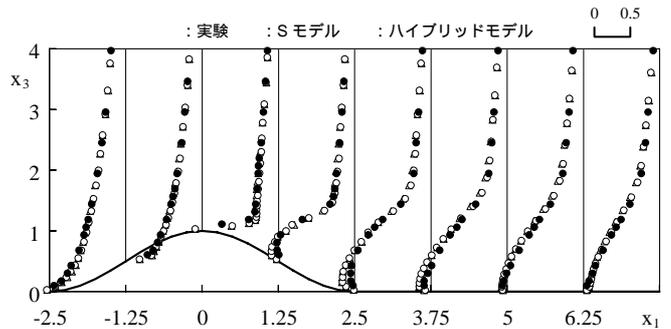


図6 主流方向平均風速 $\langle \bar{u}_1 \rangle$ の鉛直分布

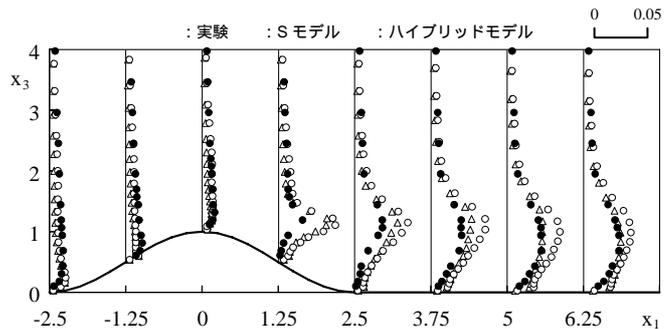


図7 乱流エネルギー k の鉛直分布

C : モデル係数, v_{SGS} : SGS 渦動粘性係数, k : 乱流エネルギー, U_{ref} : 基準風速, H : 基準高さ
謝辞 LES の比較対象とした風洞実験データは東京大学・石原孟助教授にご提供して頂いた。記して謝意を表する。
参考文献 [1] 飯塚ら, 第3回非静力学モデルに関するワークショップ (2001) pp.32-33 [2] 孟ら, 第15回風工学シンポ (1998) pp.61-66 [3] Germano ら, Phys. Fluids A3(7) (1991) pp.1760-1765 [4] Lilly, Phys. Fluids A4(3) (1992) pp.633-635